



**Universidad**  
Zaragoza

## **TRABAJO FIN DE MASTER**

# **ESTUDIO DE CARACTERISTICAS DE UN RODAMIENTO MAGNETICO AXIAL**

Autor

**Rubén Falcón Gregorio**

Director

**Jesús Letosa**

EINA/UNIZAR 2014

## RESUMEN

En este Trabajo Fin de Máster (TFM) corresponde al Master de Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Universidad de Zaragoza.

En él se ha realizado el estudio de características de un rodamiento magnético activo axial mediante simulaciones de elementos finitos.

En primer lugar, se ha elaborado una revisión del estado del arte sobre rodamientos magnéticos para estudiar las topologías que se utilizan en el diseño de los mismos. La estructura estudiada en este trabajo fue propuesta por Kimio Hijitaka en 2009 [1]. Tras esta revisión, se ha simulado un modelo mediante el programa Finite Element Method Magnetic (FEMM v4.2) a partir del modelo nombrado anteriormente [1].

El trabajo comienza con una introducción que explica el modelo que se va a simular, su estructura, funcionamiento, parámetros del diseño y metodología del programa a utilizar para su simulación. Una vez dibujado el modelo se han realizado una serie de pruebas de validez para analizar la sensibilidad de los resultados obtenidos frente a diversas modificaciones en el entorno de FEMM. Asimismo, se van a estudiar dos modelos con la misma estructura y dimensiones pero cambiando algunos aspectos como el número de vueltas de bobina y el tipo de imán. Estos dos modelos se han comparado con el modelo validado [1] mediante varios estudios para evaluar su comportamiento electromagnético.

Después, se ha profundizado en el estudio paramétrico de la geometría que define el rodamiento magnético, con el objetivo de simular un modelo mediante FEMM que mejore las prestaciones del modelo validado. Para ello, se ha implementado un algoritmo en Octave que ejecuta FEMM y permite el diseño y análisis de rodamientos magnéticos activos axiales, basados en la topología estudiada, pero con los parámetros geométricos que se deseen. Así, con esta herramienta diseñada en Octave, se ha podido llevar a cabo el estudio paramétrico del rodamiento de una manera más visual y rápida.

## INDICE GENERAL

1. INTRODUCCION .....	5
2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DEL RODAMIENTO MAGNETICO ACTIVO AXIAL .....	7
2.1 Estructura del Rodamiento Magnético .....	7
2.2 Principio de Generación de la Fuerza de Empuje Axial .....	8
3. CRITERIOS INICIALES DEL DISEÑO DEL MODELO DE SIMULACION .....	8
4. PARAMETROS DEL DISEÑO DEL MODELO MEDIANTE EL PROGRAMA FEMM .....	10
5. MATERIALES Y CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO MAGNETICO .....	10
6 ESTUDIO DEL MODELO .....	12
6.1 VERIFICACION DE LOS PARAMETROS DE CÁLCULO DEL MODELO PROPUESTO .....	12
6.1.1 - Prueba 1: Estudio del Modelo Simulado Frente a Distintas Condiciones de Mallado en FEMM .....	12
6.1.2 - Prueba 2: Estudio de Sensibilidad del Modelo Simulado con Diferentes Fronteras en el Programa FEMM.....	13
6.2 COMPARACION DEL RODAMIENTO DESARROLLADO CON LOS DATOS PUBLICADOS EN [1] .....	14
6.2.1 - Prueba 1: Estudio de Densidad de Flujo Magnético .....	14
6.2.2 - Prueba 2: Estudio de la Fuerza Axial Ejercida por el Estator en el Rotor, manteniendo Constante la Distancia de Separación o Gap a 0.8 mm y variando la Corriente DC entre 0 y 7 A.....	18
7. DESCRIPCION DEL SCRIPT EN OCTAVE PARA UN DISEÑO PARAMETRIZADO DE RODAMIENTO MAGNETICO .....	19
7.1 ALGORITMO EN OCTAVE .....	19
7.1.1 Descripción del Script para OctaveFEMM.....	19
7.2 ESTUDIO DE PRUEBAS REALIZADAS AL MODELO DISEÑADO CON OCTAVE .....	21
7.2.1 Prueba 1: Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo una Corriente DC Constante y variando el Gap. ....	22
7.2.2: Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo la Corriente DC Constante y las Dimensiones del Rotor, pero Desplazando el Rotor en la Dirección Axial.....	23
7.2.3 Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo la Corriente DC Constante y variando la longitud del rotor .....	25
8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	26
9. BIBLIOGRAFIA .....	28
10. ANEXOS .....	30

10.1 PROGRAMA FEMM .....	30
10.2 OCTAVE .....	32
10.2.1 Interfaz de Octave .....	32
10.2.2 Script Ejecutado en Octave "Principal" .....	33
10.2.3 Script en Octave " Cargar_funciones_para_dibujar" .....	35
10.2.4 Script en Octave "Datos_Geometria_RodamientoMagnetico" .....	36
10.2.5 Script en Octave " Materiales_y_Condiciones" .....	37
10.2.6 Script en Octave " Calculos_Variacion_Gap" .....	41
10.2.7 Script en Octave " Calculos_Variacion_DesplazamientoZ" .....	42

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros del Diseño [1].....	10
Tabla 2 Diferentes Fronteras de Aire .....	13
Tabla 3 Valores del Campo Magnético del Modelo 1 .....	15
Tabla 4 Valores del Campo Magnético Modelo 2 .....	16
Tabla 5 Valores del Campo Magnético del Modelo 3 .....	17
Tabla 6 Resumen Valores de Campos Magnéticos .....	17
Tabla 7 Fuerzas Rotor Desplazamiento.....	23
Tabla 8 Fuerzas Rotor Desplazamiento Izquierda.....	23
Tabla 9 Fuerzas en eje Z .....	24
Tabla 10 Fuerzas en eje -Z .....	25
Tabla 11 Fuerzas Axiales haciendo el Rotor más Pequeño .....	26
Tabla 12 Fuerzas Axiales haciendo el Rotor más Grande.....	26

## INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Rod. Magnético con disco [1] y Ilustración 2 Rod. Magnético sin disco [2] .....	5
Ilustración 3 Geometrías del estator y rotor [1] .....	7
Ilustración 4 (a), (b) y (c) Principio de Generación de la Fuerza de Empuje [1] .....	8
Ilustración 5 Parámetros Geométricos del Rodamiento Diseñado (en mm) .....	9
Ilustración 6 Variación de la Fuerza Axial con un Gap de 0.8 frente a diferentes tipos de Mallado .....	12
Ilustración 7 Variación de la Fuerza Axial frente a diferentes fronteras de aire .....	13
Ilustración 8 Distribución del Campo Magnético con Corriente Nominal [1] .....	14
Ilustración 9 Distribución del Campo Magnético .....	15
Ilustración 10 Distribución del Campo Magnético.....	16

Ilustración 11 Distribución de Campo Magnético .....	17
Ilustración 12 Variación de la Fuerza Axial frente a Variaciones de Corriente en [1].....	18
Ilustración 13 Variación de la Fuerza Axial frente a Variaciones de Corriente .....	18
Ilustración 14 Visualización del Rodamiento Magnético en el Preprocesador de FEMM .....	20
Ilustración 15 Visualización del Rodamiento Magnético en el Post-procesador de FEMM.....	21
Ilustración 16 Variación de la Fuerza Axial Disminuyendo el Gap en Eje R.....	22
Ilustración 17 Variación de la Fuerza Axial Aumentando el Gap en Eje R.....	22
Ilustración 18 Variación de la Fuerza Axial Desplazando el Rotor hacia arriba .....	23
Ilustración 19 Variación de la Fuerza Axial Desplazando el Rotor hacia abajo .....	24
Ilustración 20 Variación de la Fuerza Axial Variando la Longitud del Rotor.....	25
Ilustración 21 Mallado en el Programa FEMM .....	30
Ilustración 22 Frontera de Aire 1.5 Veces Mayor que el Diámetro del Estator.....	31
Ilustración 23 Interfaz de Octave.....	32

## INDICE DE FORMULAS

Formula 1.....	10
Formula 2.....	11
Formula 3.....	11
Formula 4 .....	11

## 1. INTRODUCCION

Los sistemas de rodamientos magnéticos son indispensables para el funcionamiento de máquinas rotativas de alta velocidad. Presentan varias ventajas respecto a los rodamientos clásicos de bolas, como son la velocidad máxima de giro, el funcionamiento sin rozamiento, ausencia de mantenimiento y bajo ruido acústico. Asimismo, su potencial para proporcionar altas velocidades sin rozamiento hace de este tipo de rodamientos el candidato ideal para algunas aplicaciones industriales como: bombas de vacío, discos duros, centrifugadoras de alta velocidad, volantes de inercia, etc.

Hasta la fecha se han construido, con frecuencia, rodamientos magnéticos axiales basados en discos de empuje en el rotor que entran en la región del estator y se utilizan para el control de suspensión activa de dirección de empuje [2]-[4]. Sin embargo, estos discos de empuje han causado diversos problemas tales como limitar la velocidad de rotación y hacer el montaje y desmontaje especialmente difícil.

El objetivo principal de este TFM es estudiar la estructura de rodamiento magnético axial activo propuesta en [1] que utiliza un núcleo de rotor cilíndrico que no se penetra en la zona del estator. Dicha topología a estudiar, se ha elegido por ser de interés en el proyecto de investigación sobre volantes de inercia que actualmente se lleva a cabo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica []. Con el modelo desarrollado, se quieren estudiar las prestaciones de este tipo de rodamiento en función de los parámetros geométricos y materiales que lo definen.

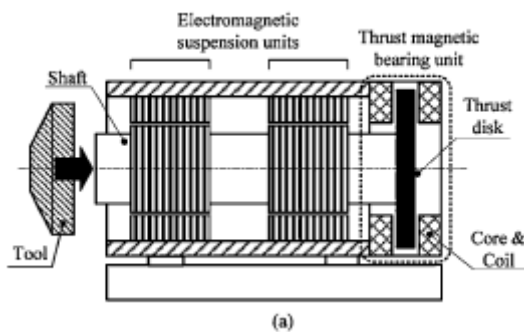


Ilustración 1 Rod. Magnético con disco [1]

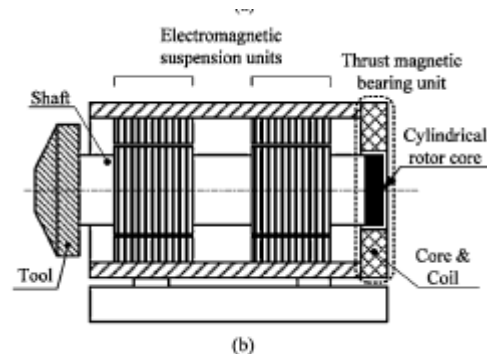


Ilustración 2 Rod. Magnético sin disco [2]

Así, los problemas que se abordan en este TFM y los objetivos que se desean cumplir se citan a continuación:

- Revisión del estado del arte sobre rodamientos magnéticos activos axiales.
- Diseño e implementación de un modelo electromagnético del rodamiento magnético activo axial mediante un programa de elementos finitos en 2D que permita el cálculo numérico.
- Comparación del modelo desarrollado con resultados del modelo validado en la bibliografía.
- Realizar un modelo parametrizado del rodamiento magnético axial utilizando un software de programación para dicha parametrización.
- Interpretación de los resultados.

Los rodamientos magnéticos son sistemas de suspensión magnética que pueden regular los desplazamientos de un eje rotatorio sin necesidad de contacto mecánico, reduciendo el mantenimiento necesario y aumentando la eficiencia de la máquina rotativa. Estas características favorecen su aplicación en máquinas rotativas de alta velocidad.

Un tema de investigación importante en la actualidad, en el ámbito de las energías renovables, es el del almacenamiento de energía. Existen muchas posibilidades, p.e. los volantes de inercia. Para esa aplicación es fundamental que la frecuencia de giro y su eficiencia en el almacenamiento de energía sea la máxima posible, por tanto se hace imprescindible la utilización de rodamientos magnéticos. Estos rodamientos magnéticos pueden usar imanes permanentes, electroimanes o ambos. El control puede ser pasivo por medio de fuerzas de restauración o activo si se controla la corriente de los electroimanes en función del desplazamiento [2]. En las últimas décadas podemos encontrar muchos informes acerca de la investigación sobre el tema, que ha dado lugar a la proposición de muchos sistemas de suspensión magnética.

Por ejemplo en el año 2000 Gorazd Stumberger [7] estudia la optimización de los rodamientos magnéticos activos radiales. El cojinete radial está numéricamente optimizado utilizando algoritmos de búsqueda directa estocásticos. La solución no lineal del potencial vector magnético se calcula usando el método de elementos finitos en 2D. La fuerza se calcula por el método de tensor de tensiones de Maxwell.

En el año 2001 Pichot [5] estudia los rodamientos magnéticos activos para grandes volantes de inercia. Su diseño es de tipo homopolar con imanes permanentes, pero coloca la parte rotórica en el exterior. Sus conclusiones incluyen un breve análisis con MEF 3D de un rodamiento radial y de un rodamiento combinado que aplica fuerza radial y de empuje. Lleva a la práctica la construcción del rodamiento radial.

En el año 2009 Kimio Hijikata, Masatsugu Takemoto [3] estudian como regular el desplazamiento axial de un eje de rotor para la rotación de alta velocidad. Se dan cuenta de que los rodamientos actuales tienen muchos problemas y proponen una nueva estructura de un rodamiento magnético sin el rotor de disco grande. Utilizan un rotor cilíndrico, que tiene un pequeño diámetro, así como una forma simple. Demuestran experimentos sobre el funcionamiento de rodamientos magnéticos a alta velocidad y que proporcionan un rendimiento suficiente para un uso práctico.

En el año 2009 Hijikata [1] propone y analiza un nuevo rodamiento axial que utiliza un acople de rotor cilíndrico, en vez de un gran disco habitual en los rodamientos axiales. Se comprueba que funciona correctamente a altas velocidades de rotación. En este trabajo, proponen un rodamiento magnético que tiene un rotor con forma cilíndrica y diseñada mediante el método de elementos finitos 3-D-FEA. Los resultados simulados han demostrado que el rodamiento magnético propuesto emplea un rotor de imán permanente y una bobina de estator sin núcleo y consigue una fuerza de empuje suficiente. Por lo tanto, este documento propone una nueva estructura de rodamiento magnético de empuje y la muestra con 3-D-FEA.

## 2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DEL RODAMIENTO MAGNETICO ACTIVO AXIAL

En este trabajo se va a modelizar el tipo de rodamiento magnético propuesto en [1].

### 2.1 Estructura del Rodamiento Magnético

Se va a modelar un rodamiento magnético activo axial cuya estructura está compuesta por un estator, dos devanados estatóricos, un rotor, un entrehierro y un imán. Estas partes constituyen el circuito magnético electromagnético del modelo, cuyas características se citan a continuación:

- Estator: Es una carcasa de forma cilíndrica y constituida de material ferromagnético en cuyo interior hay dos ranuras donde van alojadas las bobinas estatóricas.
- Dos devanados estatóricos: Son dos bobinas de cobre puestas en serie que se alojan en las dos ranuras que tiene en estator en forma de E.
- Rotor: Es un cilindro de material ferromagnético que gira respecto de su eje. El rotor se encuentra separado axialmente del estator por una distancia llamada GAP, la cual a su vez actúa como entrehierro del circuito magnético.
- Entrehierro: Es la parte como hemos dicho anteriormente que separa el estator del rotor y se le denomina GAP. En este caso el entrehierro está constituido de aire.
- Imán: El imán está magnetizado radialmente y alojado en medio de las dos bobinas que están en el estator. Este imán permite generar una fuerza axial bidireccional.

En la Figura se ilustra el rodamiento magnético activo axial en 3D. En la Figura se ven las formas geométricas que tienen tanto el rotor como el estator.

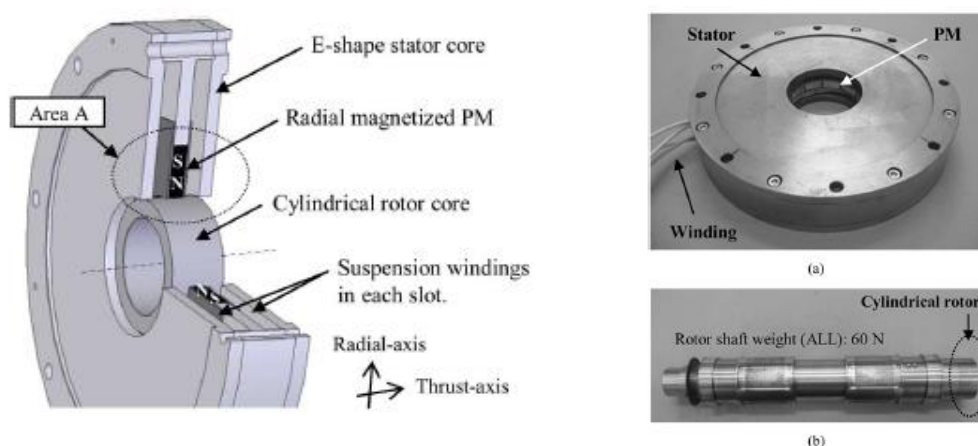


Ilustración 3 Geometrías del estator y rotor [1]



## 2.2 Principio de Generación de la Fuerza de Empuje Axial

La figura muestra el principio de la generación de la fuerza de empuje. El flujo de excitación  $B_{mag}$  es generado por el imán permanente, como se muestra en la figura 3 (a). El núcleo de rotor cilíndrico está magnetizado por la excitación  $B_{mag}$ . La corriente de suspensión fluye en los devanados de suspensión, generando el flujo de suspensión  $B_s$  como se muestra en la figura 3 (b). La figura 3 (c) muestra el campo magnético superpuesto del  $B_{mag}$  y el  $B_s$ . Es evidente que la densidad de flujo en el entrehierro del lado izquierdo se incrementa. Por el contrario, la densidad de flujo en el entrehierro del lado derecho se reduce.

Si por el contrario, el rotor magnético intentara moverse de su situación y se intentara desplazar hacia la derecha de la figura, habría un cambio de fuerzas ya que donde antes el campo decrecía, al desplazarse el rotor hacia allí el campo aumentaría y la parte izquierda del estator debería ejercer una fuerza mayor para que el rotor no se saliera de su lugar.

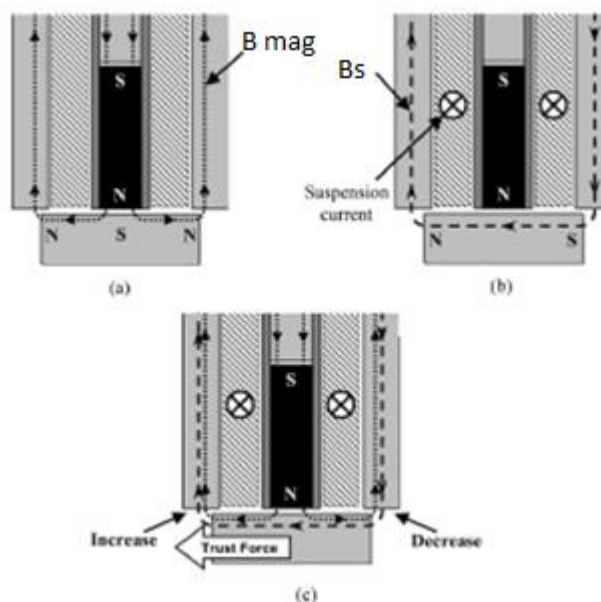


Ilustración 4 (a), (b) y (c) Principio de Generación de la Fuerza de Empuje [1]

## 3. CRITERIOS INICIALES DEL DISEÑO DEL MODELO DE SIMULACION

En este trabajo he utilizado un programa de elementos finitos llamado FEMM. Este programa es una herramienta de cálculo numérico, de software libre, que nos permite realizar diferentes estudios del rodamiento magnético en 2D. Se ha utilizado un modelo en 2D ya que el artículo estudiado [1] también lo hace así, consiguiendo una mayor facilidad y rapidez en el desarrollo del modelo a estudiar. Por el contrario, el uso de este programa también tiene unas limitaciones. Al ser un modelo 2D no puede estudiarse la fuerza radial que aparece sobre el rotor descentrado.

Antes de realizar el modelo con FEMM, se deben tener en cuenta una serie de criterios de diseño que permitan implementar el modelo del rodamiento magnético correctamente. En primer lugar, se trata de un problema de tipo magnetostático, puesto que se pretende analizar el comportamiento del flujo magnético en un electroimán generado por dos bobinas recorridas por una corriente eléctrica continua y un imán.

Además, el rodamiento a representar muestra simetría axisimétrica o axial (una simetría de revolución o cilíndrica). Asimismo, la frecuencia de operación es nula, puesto que se trabaja con corriente continua.

Finalmente, para representar el modelo en FEMM, se dibuja la sección transversal de medio rodamiento, siguiendo el modelo propuesto por [1].

A partir de dicha sección, se pueden visualizar los parámetros geométricos del rodamiento magnético que definen las dimensiones del mismo, tal y como se ilustra en la Figura 4. En dicha figura, se aprecia que el Eje Z es el que representa la simetría axial o de revolución del rodamiento

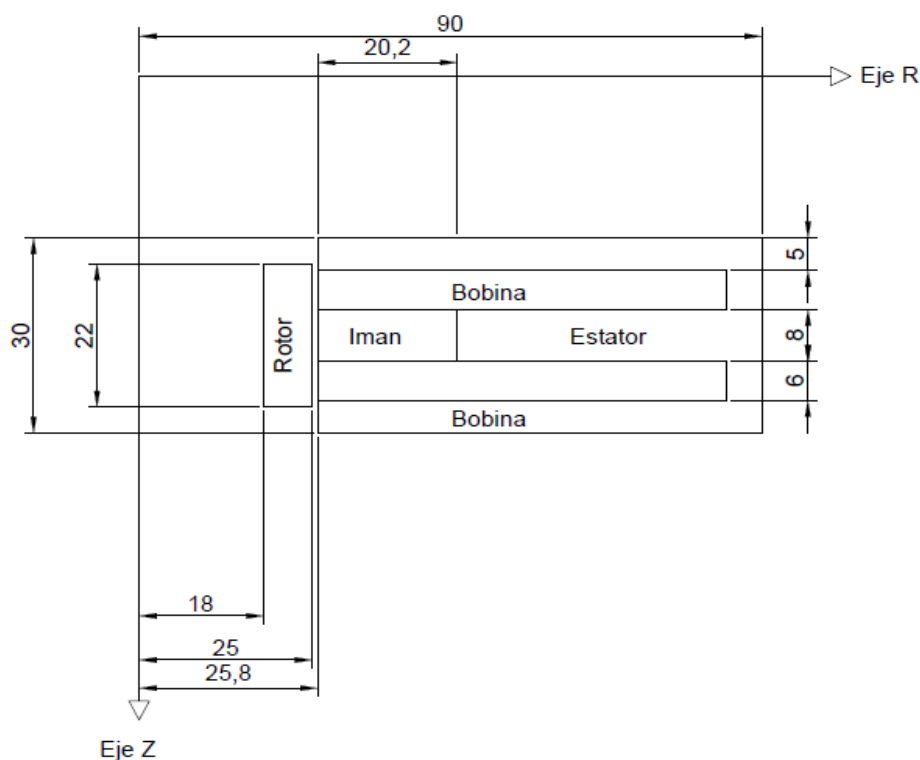


Ilustración 5 Parámetros Geométricos del Rodamiento Diseñado (en mm)

#### 4. PARAMETROS DEL DISEÑO DEL MODELO MEDIANTE EL PROGRAMA FEMM

Una vez fijados los criterios iniciales de diseño, se dibuja el rodamiento magnético en FEMM con las dimensiones del modelo validado propuesto en [1]. Los parámetros de dicho modelo son:

Parámetros	Medidas
Peso del Rotor	60 N
Longitud del GAP	0.8 mm
Factor empaquetamiento bobina	39.7 %
Diámetro del estator	180 mm
Diámetro del rotor	50 mm
Longitud del estator	30 mm
Longitud del rotor	22 m
Longitud de solape	1 mm

Tabla 1 Parámetros del Diseño [1]

#### 5. MATERIALES Y CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO MAGNETICO

El modelo validado propuesto en [1] no especifica los materiales que se utilizan para el diseño del rodamiento magnético.

En primer lugar, para el devanado estático se ha escogido una bobina de cobre. En segundo lugar, revisando el estado del arte, la mayoría de los rodamientos magnéticos están hechos con materiales ferromagnéticos [11]. Estos materiales presentan valores de permeabilidad relativa superiores a 1000 [11].

Considerando el circuito magnético equivalente del rodamiento, la reluctancia del material se puede traducir como la “dificultad que ofrece dicho material al paso del flujo magnético”. Así, cuanto mayor es la permeabilidad  $\mu$  del material, menor es la reluctancia  $R$  y, por tanto, más fácilmente circula el flujo magnético, tal y como se aprecia en la fórmula 1.

$$R = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

Formula 1

Siendo:

**R:** Reluctancia magnética, en  $\text{Av/Wb}$ .

**l:** Longitud de la trayectoria del circuito magnético, en m.

**$\mu$ :** Permeabilidad del material, adimensional.

**S:** Sección del material atravesada por el flujo magnético, en  $\text{m}^2$

En tercer lugar, revisando el estado del arte, en [8] nombra que los rodamientos magnéticos hasta hace pocos años se fabricaban con imanes de Samario Cobalto. Con el criterio de maximizar la fuerza axial he utilizado imanes con grandes campos magnéticos remanentes ( $B_r$ ). Los imanes con mayor campo magnético que aparecen en la librería del programa FEMM son los de Neodimio de Boro. Debido a estas deducciones he diseñado dos modelos usando con cada uno de los imanes nombrados anteriormente. Al diseñar estos dos modelos de rodamiento magnético y utilizar un imán con  $B_r$  elevado como es el de Neodimio de Boro y otro como es el de Samario Cobalto he observado que se necesitan muy pocas vueltas de bobina para conseguir datos muy similares al modelo estudiado [1] y por esto en el estator hay una gran área de ventana libre, es decir, no hay vueltas de bobina y se queda con aire. Por esto, como explicare más adelante, he diseñado un tercer modelo con  $B_r$  menor pero con la bobina ocupando todo el espacio requerido. Este tercer modelo también lo he comparado con el modelo estudiado [1]. Los tres tipos de rodamientos que he estudiado son los siguientes:

- Modelo 1: Rodamiento Magnético con 60 vueltas de bobina e imán Neodimio de Boro NdBF<sub>e</sub> 52. Es el primer modelo que diseñé ya que el artículo estudiado no facilitaba ni el tipo de imán usado, ni el número de vueltas de bobina, ni el tipo de acero ...
- Modelo 2: Rodamiento Magnético con 65 vueltas de bobina e imán de Samario Cobalto 27: Este segundo modelo lo he diseñado ya que informándome he visto que es el imán que más se usaba anteriormente.
- Modelo 3: Rodamiento Magnético con 95 vueltas de bobina e imán Alnico 8: Este tercer modelo que he diseñado lo realicé debido a que en el hueco donde va insertada la bobina se quedaba mucho espacio sin utilizar. Con el programa FEMM observé que el área existente para la bobina en el artículo [1] era:

$$S_{\text{Ventana}} = 354 \text{ mm}^2 \quad \text{Formula 2}$$

Buscando en [18-19] he observado que la densidad de corriente en una bobina se puede elegir en torno a un valor de  $J = 5 \text{ A/mm}^2$ . Como la corriente sí que la facilita el informe  $I = 6.79 \text{ A}$  la sección del cable de la bobina se calcula como:

$$S_{\text{Cable}} = I / J = 6.79 / 5 = 1.358 \text{ mm}^2 \rightarrow 1.5 \text{ mm}^2 \quad \text{Formula 3}$$

Una vez que ya tenemos calculada la sección del cable y conocemos la sección de la ventana utilizada por la bobina y  $K$  es una constante de valor 0.4 [1] he calculado el número de vueltas de dicha bobina:

$$S_{\text{Ventana}} = (N * S_{\text{Cable}}) / K = 95 \text{ vueltas de bobinas} \quad \text{Formula 4}$$

## 6 ESTUDIO DEL MODELO

En estos apartados se van a realizar una serie de pruebas para comparar el trabajo realizado en este TFM con el artículo estudiado [1].

### 6.1 VERIFICACION DE LOS PARAMETROS DE CÁLCULO DEL MODELO PROPUESTO

En este apartado se han realizado pruebas para comprobar si los modelos desarrollados mediante elementos finitos con el programa FEMM tienen una precisión adecuado respecto al mallado utilizado y a la posición de la frontera exterior. Las pruebas son las siguientes:

- Prueba 1: Estudio de sensibilidad del modelo simulado con diferentes tipos de mallado en el programa FEMM
- Prueba 2 : Estudio de sensibilidad del modelo simulado con diferentes fronteras en el programa FEMM

#### 6.1.1 - Prueba 1: Estudio del Modelo Simulado Frente a Distintas Condiciones de Mallado en FEMM

En este primer caso se va a evaluar la sensibilidad de los resultados obtenidos del modelo simulado de rodamiento magnético frente a distintas condiciones de mallado en FEMM.

Se va a observar como varia la fuerza axial en un Gap de 0.8 mm con diferentes tipos de mallados y manteniendo una corriente constante de 6.79 A. La figura siguiente lo representa:

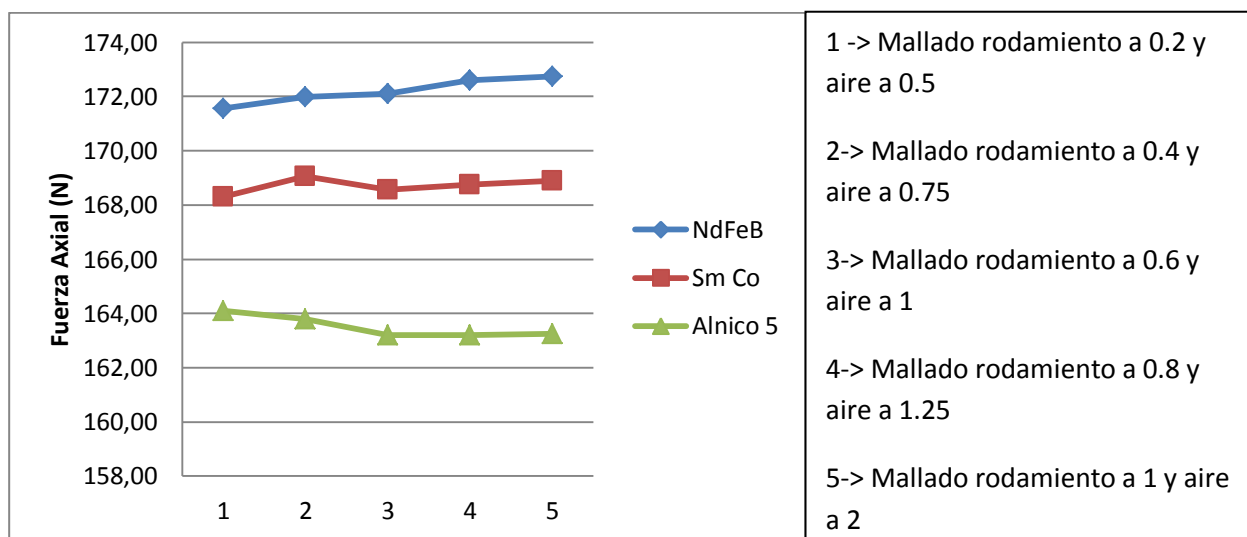


Ilustración 6 Variación de la Fuerza Axial con un Gap de 0.8 frente a diferentes tipos de Mallado

Como se observa en la figura la variación de fuerza axial con un gap de 0.8 con distintos tipos de mallados en los tres casos es casi nula, observándose solo un 2% de diferencia. El tamaño del mallado en el trabajo se ha considerado pequeño ya que estamos trabajando con unidades

pequeñas como es el milímetro y variaciones muy pequeñas. He considerado un mallado de 0.6 en el modelo simulado en FEMM. (Ver ejemplo de mallado en anexos 1)

### 6.1.2 - Prueba 2: Estudio de Sensibilidad del Modelo Simulado con Diferentes Fronteras en el Programa FEMM

En este segundo caso se va a evaluar la sensibilidad de los resultados obtenidos del modelo simulado de rodamiento magnético frente a diferentes fronteras en FEMM.

Lo primero de todo se van a crear fronteras de varios tamaños donde se situará el rodamiento magnético. Así, las distintas fronteras analizadas están constituidas por un semicírculo cuyos radios son (ver ejemplo de frontera en anexos 1):

Fronteras
1,25 x R estator
1,50 x R estator
2 x R estator
5 x R estator

Tabla 2 Diferentes Fronteras de Aire

En las siguiente figura se muestran las distintas curvas de fuerza axial frente a un gap de 0.8 mm con una corriente constante de 6.79 A obtenidas con FEMM, en función del tamaño de la frontera. Se puede observar que los resultados obtenidos son muy similares independientemente del tamaño de la frontera. Así, la mayor zona de concentración de flujo magnético se localiza en el rodamiento magnético y, por tanto, una frontera que abarque 1.5 veces el radio del estator es suficiente. Además, este tamaño de frontera escogido permite una ejecución de FEMM más rápida, puesto que es uno de los tamaños de frontera más pequeño de entre los analizados.

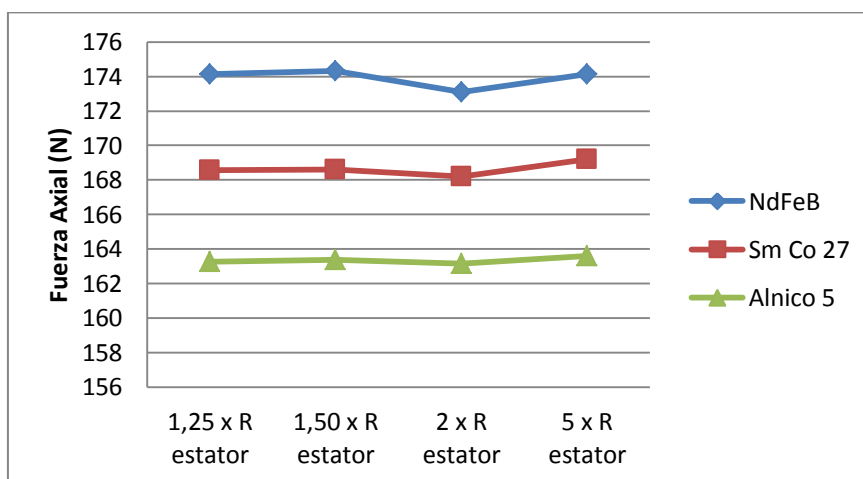


Ilustración 7 Variación de la Fuerza Axial frente a diferentes fronteras de aire

En esta figura se observa como la variación de fuerza axial con un Gap de 0.8 variando la frontera es prácticamente la misma. La variación de fuerza es de apenas un 3 %.

## 6.2 COMPARACION DEL RODAMIENTO DESARROLLADO CON LOS DATOS PUBLICADOS EN [1]

Una vez realizadas las pruebas de validez del modelo respecto al mallado y fronteras de aire y observar que alcanza una precisión suficiente respecto a dichos parámetros, he realizado diferentes pruebas para comparar los resultados obtenidos con los modelos simulados y los datos del modelo publicado [1]. Las pruebas son las siguientes:

- Prueba 1: Estudio de densidad de Flujo Magnético
- Prueba 2: Estudio de la fuerza axial ejercida por el estator en el rotor, manteniendo constante la distancia de gap a 0.8 mm y variando la corriente DC entre 0 y 7 A.

### 6.2.1 - Prueba 1: Estudio de Densidad de Flujo Magnético

En esta primera prueba se va a observar si los dos modelos diseñados con el programa FEMM tienen los mismos campos magnéticos que el modelo estudiado manteniendo una corriente constante como se nombra en el informe estudiado [1].

La siguiente figura nos muestra la distribución de flujo de densidad (campo magnético) que tiene el modelo estudiado:

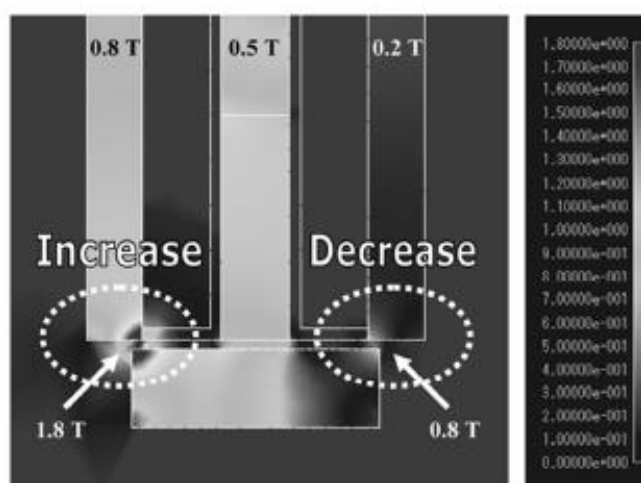
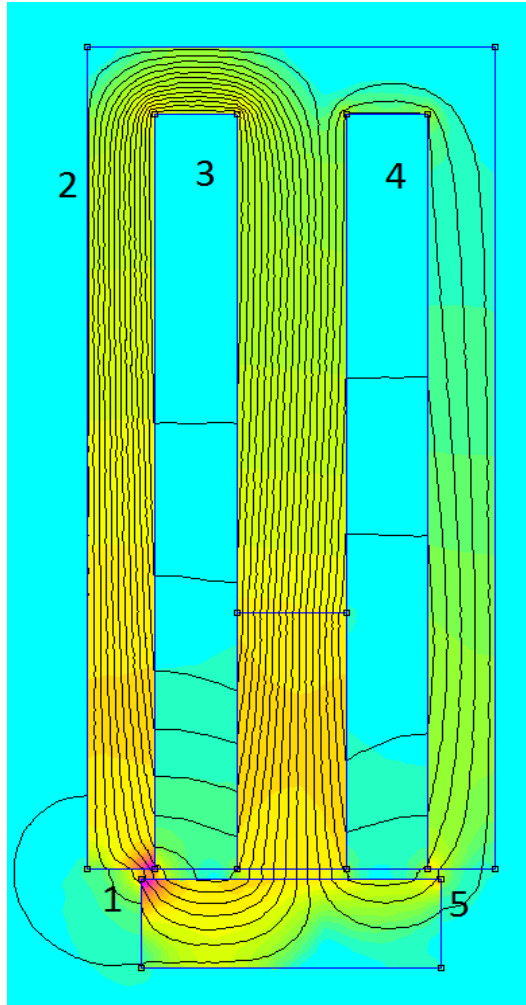


Ilustración 8 Distribución del Campo Magnético con Corriente Nominal [1]

Como se observa en la figura 7 gracias al campo magnético generado por las bobinas y sumado al campo magnético generado por el imán se observa que en la parte izquierda del rodamiento magnético el campo es mucho mayor. Por el contrario se observa que en la parte derecha el campo es mucho menor.

Una vez examinado esto, los valores anteriores de campo magnético hay que compararlos con los valores campos magnéticos de los tres modelos diseñados. Primero se ha comparado con el primer modelo diseñado:



Punto	Campo Magnético (T)
1 -> (25.2 , 89.6)	1.8156
2 -> (86.3 , 91.1)	0.8034
3 -> (86.1 , 79.2)	0.5146
4 -> (83.9 , 67.2)	0.2152
5 -> (25.4 , 68.1)	0.8207

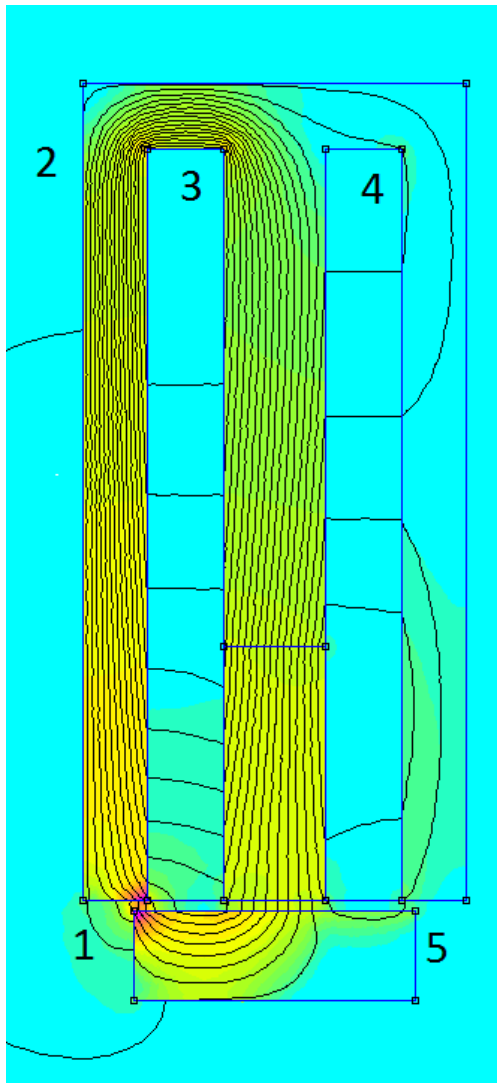
Tabla 3 Valores del Campo Magnético del Modelo 1

Ilustración 9 Distribución del Campo Magnético  
en Modelo 1

Como se observa en la tabla anterior, los valores de campo magnéticos del primer modelo diseñado con el modelo estudiado son prácticamente similares.



Ahora se han comparado con el segundo modelo diseñado. Los datos son los siguientes:



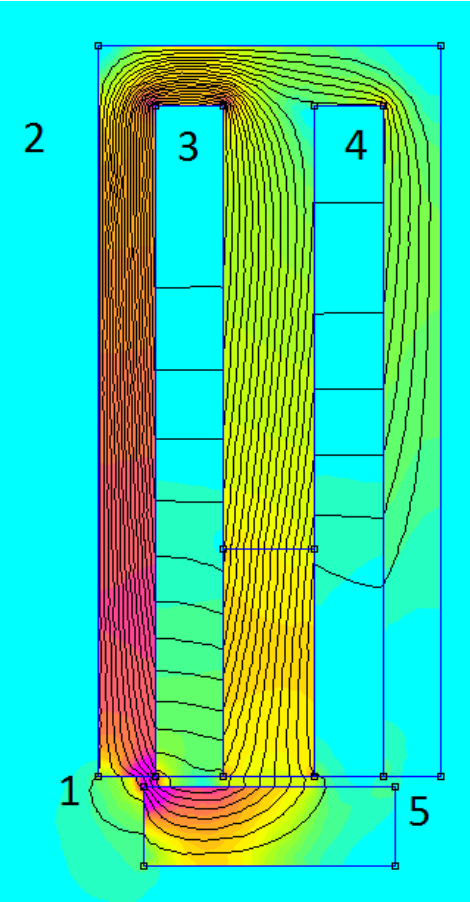
Punto	Campo Magnético (T)
1 -> (25.6 , 89.5)	1.7259
2 -> (84.7 , 91.7)	0.8134
3 -> (84.7 , 79.2)	0.5049
4 -> (83.9 , 67.9)	0.1261
5 -> (25.1 , 68.1)	0.3568

Tabla 4 Valores del Campo Magnético  
Modelo 2

Ilustración 10 Distribución del Campo Magnético  
en Modelo 2

Se observa en la tabla que la parte izquierda de del rodamiento magnético tiene campos un poco inferiores a los del modelo estudiado [1].

Por último se van a comparar los valores con los del tercer modelo simulado



Punto	Campo Magnético (T)
1 -> (26.54 , 89.5)	1.6837
2 -> (85.5 , 91.8)	0.8263
3 -> (84.3 , 79.8)	0.5129
4 -> (85 , 66.4)	0.2123
5 -> (25.2 , 68.2)	0.1481

Tabla 5 Valores del Campo Magnético del Modelo 3

Ilustración 11 Distribución de Campo Magnético en Modelo 3

Como se observa en esta tabla y en la figura, en este tercer modelo los campos magnéticos son parecidos al modelo estudiado [1] menos en el número 5 donde el campo está cerca de cero. En la siguiente tabla se ve una comparación de los tres modelos:

Punto	Modelo estudiado	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	1.8	1.8156	1.7259	1.6837
2	0.8	0.8034	0.8134	0.8263
3	0.5	0.5146	0.5049	0.5129
4	0.2	0.2152	0.1261	0.2123
5	0.8	0.8207	0.3568	0.1481

Tabla 6 Resumen Valores de Campos Magnéticos

### 6.2.2 - Prueba 2: Estudio de la Fuerza Axial Ejercida por el Estator en el Rotor, manteniendo Constante la Distancia de Separación o Gap a 0.8 mm y variando la Corriente DC entre 0 y 7 A

En este último caso, se va a calcular la fuerza axial ejercida por el estator en el disco rotórico variando la corriente que circula por la bobina del devanado estatórico, manteniendo una distancia de gap constante. La corriente inicial será de 0 A y se irá aumentando progresivamente, con incrementos de 1 A, hasta alcanzar una corriente de 7 A. Para ello, se irá modificando la corriente que circula por la bobina. La siguiente figura nos muestra como varía la fuerza axial a la vez que varía la corriente progresivamente manteniendo un Gap constante de 0.8 mm:

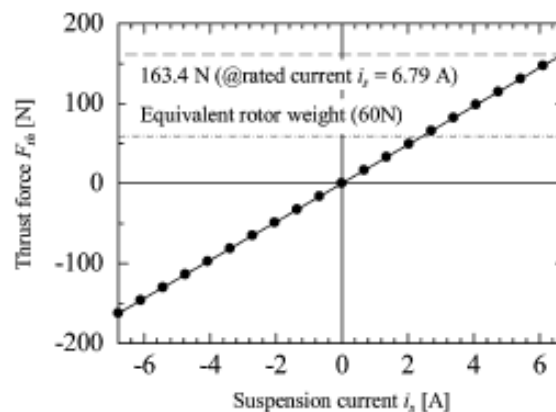


Ilustración 12 Variación de la Fuerza Axial frente a Variaciones de Corriente en [1]

Como se observa en la figura anterior, la fuerza varía linealmente a la vez que varía la corriente que circula por las bobinas. Estos valores lo he comparado con los tres modelos diseñados.

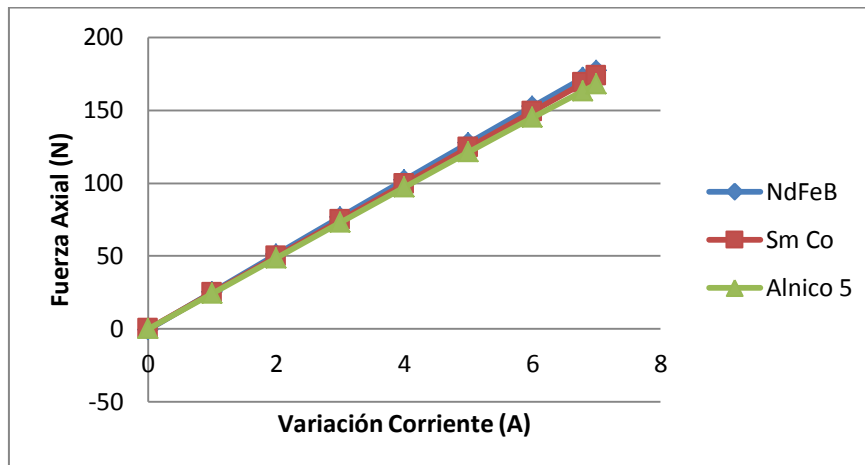


Ilustración 13 Variación de la Fuerza Axial frente a Variaciones de Corriente

Se ve claramente que en los tres modelos diseñados la variación de fuerza axial respecto a la corriente es totalmente lineal igual que en el modelo estudiado [1]. Analizando la figura 12 se observa que el comportamiento del modelo simulado se aproxima a lo expuesto en [10], donde se cita que la fuerza axial tiene una relación lineal con la corriente. La fuerza axial con la corriente nominal en el modelo [1] es 163.4 N. Los tres modelos estudiados tienen una fuerza axial de 172.11 N, 168.5 N y 163.2 N respectivamente. El error es de apenas 4 %.

## **7. DESCRIPCION DEL SCRIPT EN OCTAVE PARA UN DISEÑO PARAMETRIZADO DE RODAMIENTO MAGNETICO**

Como se ha visto en los apartados anteriores, los valores de campos magnéticos y de fuerzas axiales de los tres modelos diseñados eran similares al modelo del artículo estudiado [1]. Una vez observado esto se pretende realizar una serie de modificaciones en los parámetros geométricos del rodamiento con la finalidad de obtener un modelo que genere mayor fuerza axial que la del modelo publicado en [1].

Para ello, se ha diseñado un algoritmo con el lenguaje de programación Octave. Este algoritmo permite el diseño y análisis de un rodamiento magnético activo axial en FEMM, con las dimensiones que se deseen y siguiendo la estructura descrita anteriormente (Figura 4). Para esta parte del trabajo se va a utilizar el modelo 1 descrito en los apartados anteriores ya que es el que tiene valores similares al modelo estudiado en el artículo [1]

A continuación voy a explicar brevemente que es Octave ya que es uno de los programas utilizados en el desarrollo de este proyecto.

Octave o GNU Octave es un programa de software libre para realizar cálculos numéricos. Como indica su nombre es parte de proyecto GNU. MATLAB es considerado su equivalente comercial. Entre varias características que comparten se puede destacar que ambos ofrecen un intérprete permitiendo ejecutar órdenes en modo interactivo. Cabe indicar que Octave no es un sistema de álgebra computacional como podría ser Maxima, sino que usa un lenguaje que está orientado al análisis numérico.

### **7.1 ALGORITMO EN OCTAVE**

Lo primero de todo es explicar que algoritmo se ha llevado a cabo para poder realizar las pruebas descritas anteriormente al modelo. La descripción del algoritmo de Octave se puede dividir en tres partes: La interfaz gráfica para Octave (ver anexos 2), el contenido del algoritmo y los resultados que aporta el mismo.

#### **7.1.1 Descripción del Script para OctaveFEMM**

Un script es un código que sigue una serie de comando escritos en un lenguaje de programación. Este caso está escrito en un fichero de texto pero con extensión \*.m que después será ejecutado con el programa Octave.

La función de nuestro script es modelizar un rodamiento magnético parametrizado, del tipo estudiado [1], en función de los datos introducidos por el usuario. Me he ayudado de la estructura de programación propuesta en [17] para el desarrollo del script, que paso a describir brevemente a continuación:

Los parámetros geométricos, de materiales, condiciones de la simulación etc. se agrupan en una variable tipo “estructura de datos” de Octave.

El script está dividido en una serie de módulos, escritos en distintos ficheros.m según su funcionalidad. Todos estos módulos son llamados por un fichero denominado Principal.m

**Principal:** el objetivo de este script es organizar el flujo del programa, es decir, definir los directorios a los que debe acceder Octave, llamar a FEMM, dibujar en FEMM, aplicar los materiales correspondientes a cada parte del rodamiento magnético, calcular el modelo diseñado y postprocesar los resultados de acuerdo al criterio de estudio que se requiera.

El programa principal comienza indicando la ruta de trabajo a Octave mediante el comando

```
Addpath ("C:\\*");
```

Después se definen una serie de subprogramas que son los siguientes:

**Cargar\_funciones\_para\_dibujar:** Como el nombre indica, carga las funciones necesarias para dibujar el rodamiento magnético

**Datos\_Geometria\_RodamientoMagnetico:** Aquí se cargan los datos introducidos por el usuario para diseñar la geometría del rodamiento magnético.

**Materiales\_y\_Condiciones:** Se cargan los materiales y las propiedades técnicas al diseño del rodamiento magnético

Una vez esto, el siguiente paso es comunicarse con el programa de elementos finitos FEMM v4.2 mediante una serie de comandos (ver anexos)

Gracias a esta serie de programas se visualiza lo siguiente:

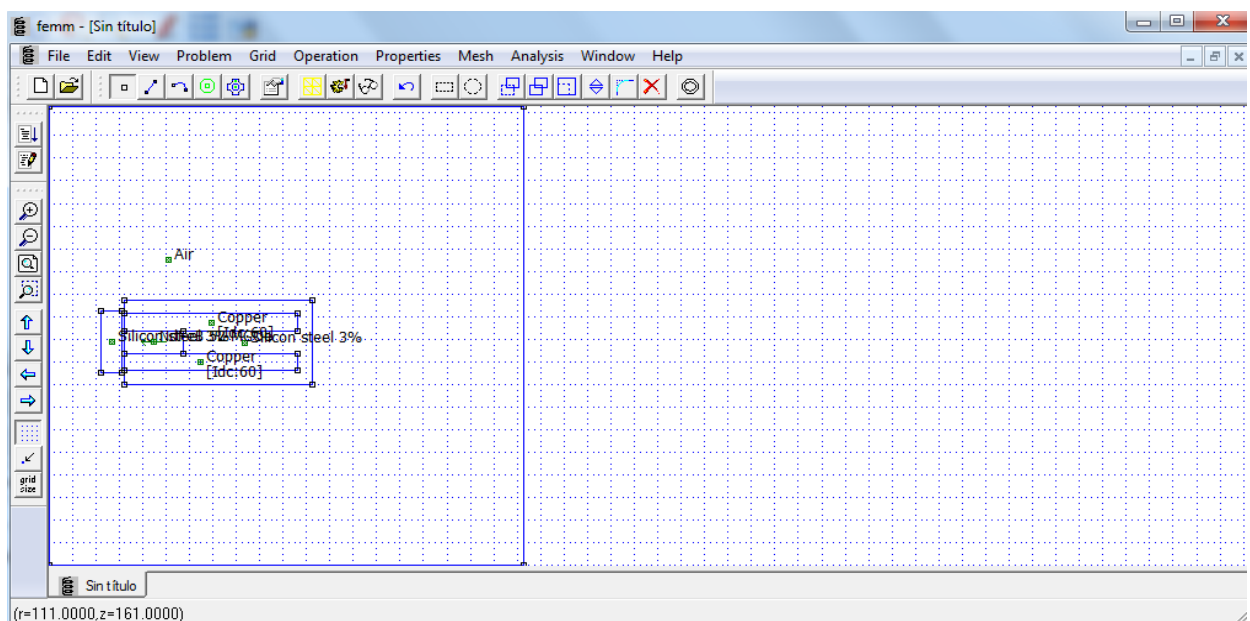


Ilustración 14 Visualización del Rodamiento Magnético en el Preprocesador de FEMM

Una vez dibujado el rodamiento magnético, los siguientes comandos son aplicados en el post-procesador del programa de elementos finitos que son los siguientes:

**mi\_analyze (0):** Ejecuta el proceso de cálculo del preprocesador al post-procesador de FEMM

**mi\_loadsolution:** Carga y muestra la solución correspondiente a la geometría

**Calculos\_Variacion\_GAP:** Calcula la fuerza axial en función de una variación de Gap, de posición de rotor o de variación de medidas del rotor introducida por el usuario y con una corriente DC constante.

**Calculos\_Variacion\_DesplazamientoZ:** Calcular la fuerza axial en función del desplazamiento del rotor en el Eje z con una corriente DC constante.

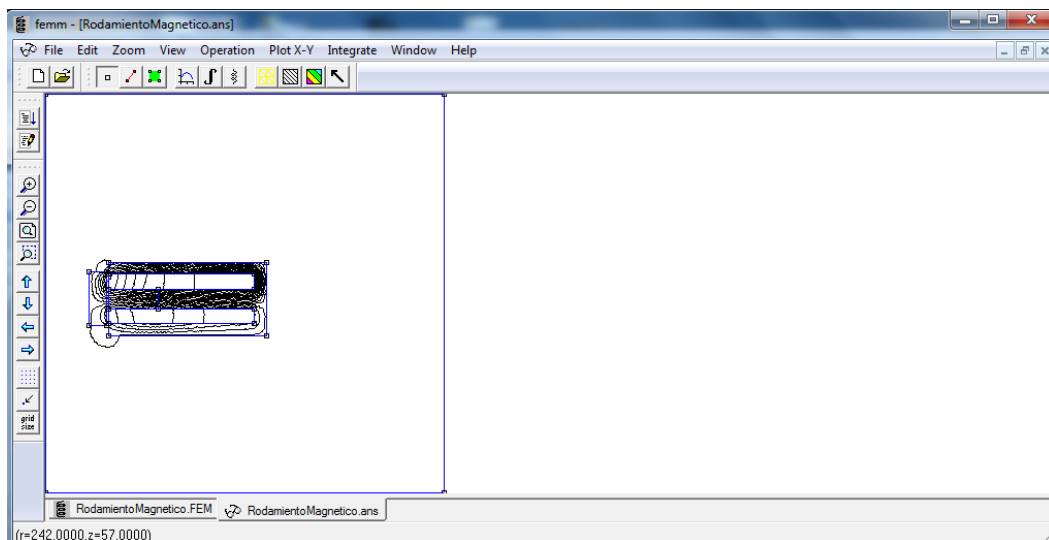


Ilustración 15 Visualización del Rodamiento Magnético en el Post-procesador de FEMM

## 7.2 ESTUDIO DE PRUEBAS REALIZADAS AL MODELO DISEÑADO CON OCTAVE

Una vez realizado todo el algoritmo con el programa Octave y verificar que funciona adecuadamente, se han llevado a cabo una serie de pruebas en el modelo para observar diferentes valores que se obtengan y poder compararlos con el artículo [1]. Las pruebas son las siguientes:

- Prueba 1. Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo una Corriente DC Constante y variando el Gap.
- Prueba 2 Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo la Corriente DC Constante y las Dimensiones del Rotor, pero moviendo el Rotor en la Dirección Axial.
- Prueba 3: : Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo la Corriente DC Constante y variando la longitud del rotor

**7.2.1 Prueba 1: Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo una Corriente DC Constante y variando el Gap.**

En este caso se va a calcular la fuerza axial ejercida por el estator en el cilindro rotórico variando la distancia que los separa. Primero se va a observar como varia la fuerza axial reduciendo el gap desde 0.8 que es el inicial hasta 0.1 (justo antes de que rotor y estator contacten). La siguiente figura lo demuestra:

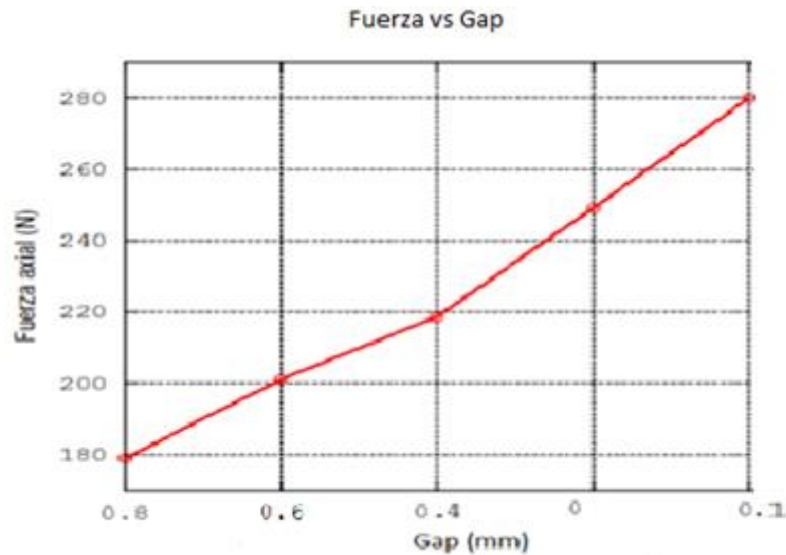


Ilustración 16 Variación de la Fuerza Axial Disminuyendo el Gap en Eje R

Como se observa en la figura anterior, mientras se va haciendo el Gap más pequeño la fuerza axial incrementa porque el campo magnético es mayor [10]. Ahora se va a observar como varia la fuerza axial aumentando el Gap. La siguiente figura lo muestra:

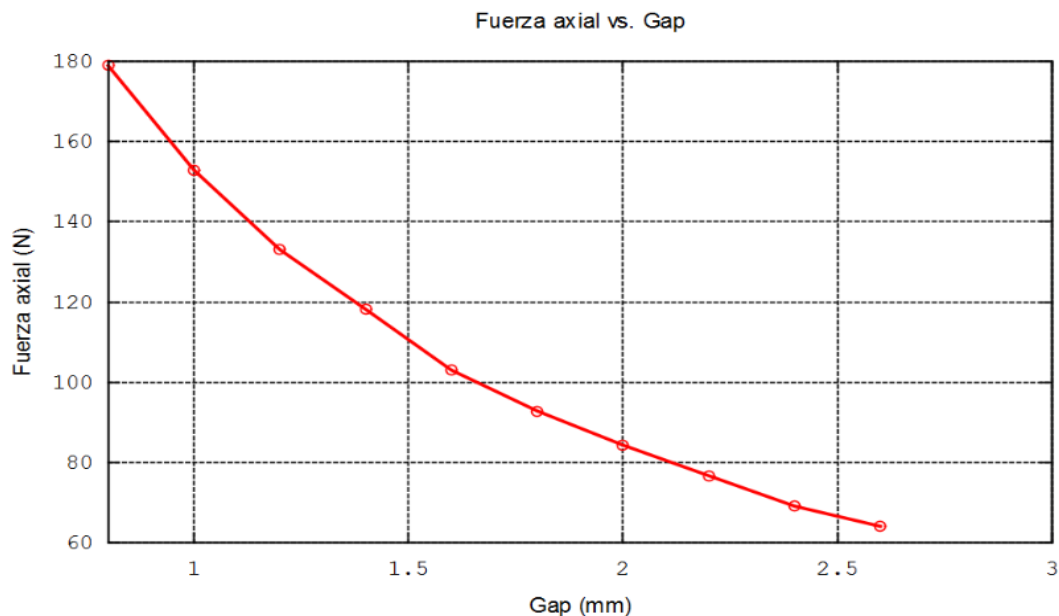


Ilustración 17 Variación de la Fuerza Axial Aumentando el Gap en Eje R

Analizando la figura 15 se observa que el comportamiento del modelo simulado se aproxima a lo expuesto en [10], donde se cita que la fuerza axial es inversamente proporcional al cuadrado del gap.

Gap (mm)	Fuerza (N)
0.8	178.91
0.6	201.10
0.4	218.66
0.2	249.17
0	280.04

Tabla 7 Fuerzas Rotor Desplazamiento

a la Derecha

Gap (mm)	Fuerza (N)
0.8	178.91
1	158.86
1.2	133.074
1.4	118.193
1.6	103.11
1.8	92.83
2	84.33
2.2	76.70
2.4	69.12
2.6	64.10

Tabla 8 Fuerzas Rotor Desplazamiento Izquierda

### **7.2.2: Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo la Corriente DC Constante y las Dimensiones del Rotor, pero Desplazando el Rotor en la Dirección Axial.**

En este apartado se quiere observar como varia la fuerza axial ejercida en el rotor desplazando este en el eje z hacia arriba y hacia abajo.

Primero se va a analizar el comportamiento de la fuerza desplazando el rotor en la dirección positiva del eje Z. Se observa en la siguiente figura:

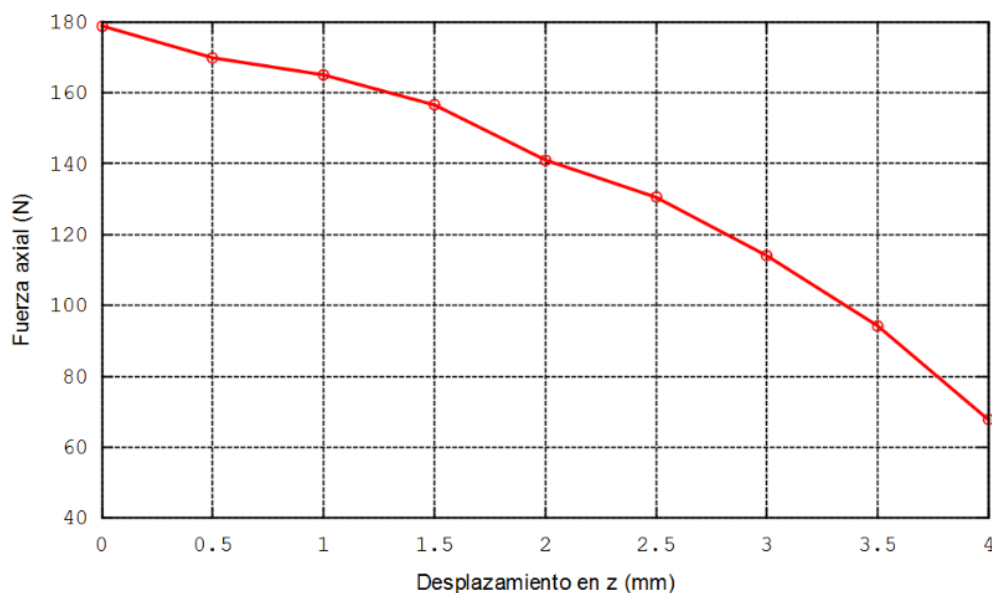


Ilustración 18 Variación de la Fuerza Axial Desplazando el Rotor hacia arriba



Como se puede apreciar en la figura () la fuerza axial ejercida por el estator en el rotor al variar la posición de este hasta un máximo de 4 mm en la dirección positiva de z disminuye rápidamente. En 4 mm la fuerza lleva a descender un 62.5 %.

La siguiente tabla muestra la variación numérica de la fuerza:

Desplazamiento en eje z (mm)	Fuerza (N)
0	178.91
0.5	169.885
1	165.069
1.5	156.6
2	141.07
2.5	130.510
3	114.1
3.5	94.198
4	67.66

Tabla 9 Fuerzas en eje Z

En segundo lugar se va a analizar el comportamiento de la fuerza desplazando el rotor en la dirección negativa del eje z. Se observa en la siguiente figura:

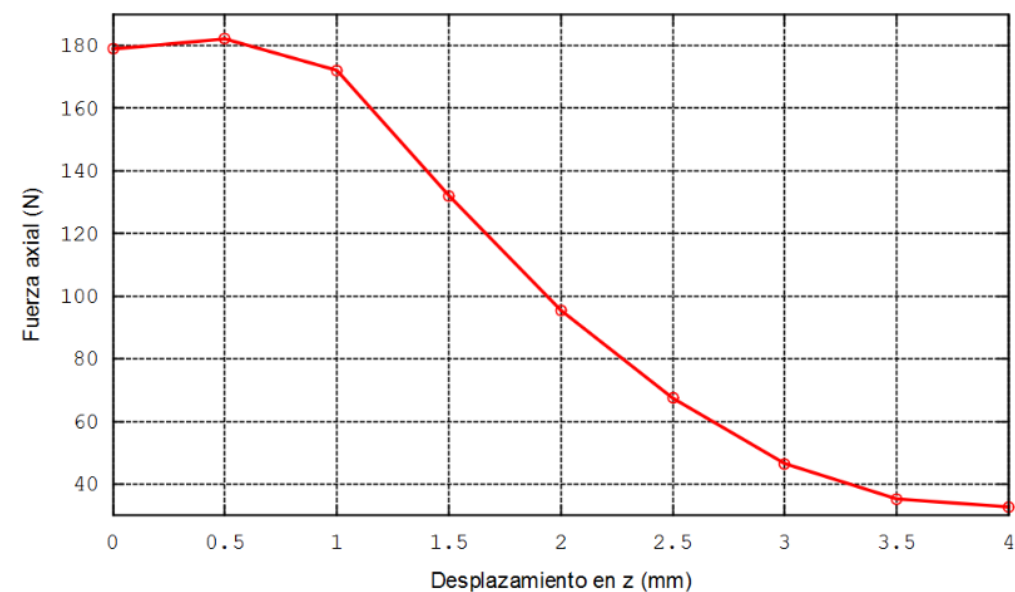


Ilustración 19 Variación de la Fuerza Axial Desplazando el Rotor hacia abajo

Como se puede apreciar en la figura () la fuerza axial ejercida por el estator en el rotor al variar la posición de este hasta un máximo de 4 mm en la dirección negativa de z también disminuye rápidamente. En 4 mm la fuerza lleva a descender un 81.8 %.

La siguiente tabla muestra la variación numérica de la fuerza:

Desplazamiento en eje z (mm)	Fuerza (N)
0	178.91
0.5	182.14
1	172.1
1.5	132.114
2	95.48
2.5	67.44
3	46.514
3.5	35.232
4	32.711

Tabla 10 Fuerzas en eje -Z

### **7.2.3 Estudio de la Fuerza Axial ejercida por el Estator en el Rotor manteniendo la Corriente DC Constante y variando la longitud del rotor**

En este tercer apartado se quiere observar como varia la fuerza axial en el rotor variando las dimensiones del mismo, es decir, haciéndolo más grande y más pequeño manteniendo una corriente DC constante y un Gap a 0.8 mm. En este apartado me he ayudado exclusivamente del programa de elementos finitos FEMM variando la longitud del rotor en intervalos de 1 mm. La siguiente figura lo muestra:

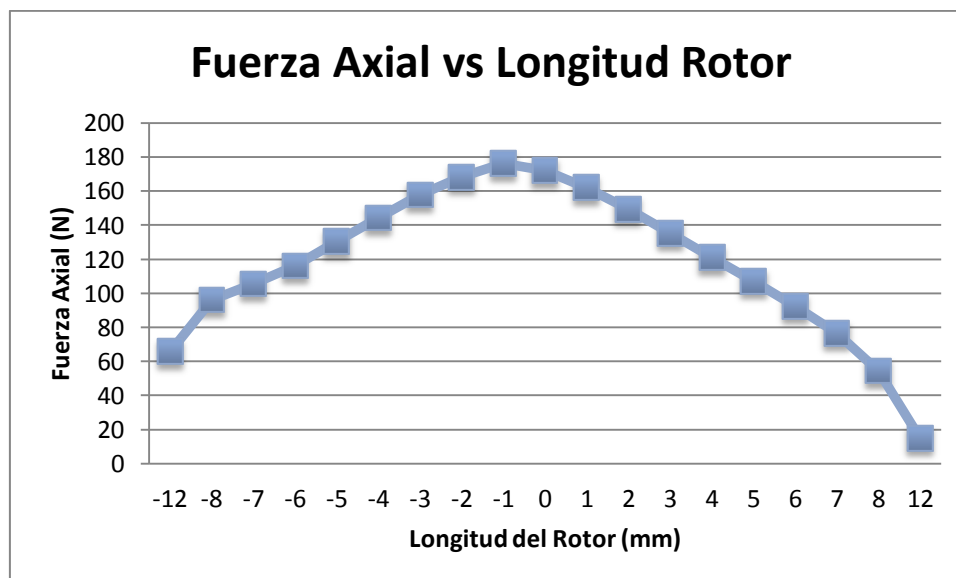


Ilustración 20 Variación de la Fuerza Axial Variando la Longitud del Rotor

Como se observa en la figura, cuanto más largo se hace el rotor menor es la fuerza axial al igual que cuando el rotor se va haciendo más pequeño que también la fuerza es menor. Hay un punto de la gráfica donde la fuerza axial es mayor que en condiciones iniciales del modelo, consiguiendo así un nuevo modelo con mayor fuerza axial inicial. Este caso se da cuando el rotor es 1 mm más pequeño que al inicio.

En las siguientes tablas se observan las dimensiones y fuerzas axiales del rotor:

Dimensiones	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-12
Fuerza	172,11	176,088	168,342	157,99	144,293	130,25	116,26	105,54	96,11	65,6

Tabla 11 Fuerzas Axiales haciendo el Rotor más Pequeño

Dimensiones	0	1	2	3	4	5	6	7	8	12
Fuerza	172,11	162,118	149,557	135,33	120,82	107,14	92,43	76,48	54,41	14,77

Tabla 12 Fuerzas Axiales haciendo el Rotor más Grande

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En primer lugar, en este TFM se ha llevado a cabo una modelización de un rodamiento magnético activo axial basado la topología descrita en [1]. Se ha realizado también un estudio comparativo entre los modelos simulados de elementos finitos y el modelo validado [1].

Comparando el modelo realizado se ha podido observar que una vez realizadas las pruebas de validez del mallado y fronteras de aire los 3 casos estudiados alcanzan una precisión suficientemente buena. Una vez realizadas estas pruebas se han realizado otras para comparar los resultados obtenidos con los modelos simulados y los datos del modelo publicado [1]. Se puede observar cómo aunque la segunda prueba (6.2.2) los resultados eran muy similares en los tres casos, en la prueba 1 (6.2.1) el modelo que más se acercaba al modelo validado [1] era el modelo 1 (Neodimio de Boro). Por esto en los siguientes apartados del TFM se ha utilizado el primer modelo.

Una vez realizado esto se ha desarrollado un algoritmo con OctaveFEMM que permite, el diseño y análisis del rodamiento magnético activo axial mediante FEMM con los parámetros geométricos que se deseen. Concretamente, se han diseñado dos sub-algoritmos que permiten el cálculo de la fuerza axial ejercida por el estator del rodamiento sobre el rotor frente a variaciones de posición en el Eje z y una corriente constante (Calculos\_Variacion\_DesplazamientoZ) y frente a variaciones del gap con una corriente constante (Calculos\_Variacion\_Gap), lo que permite un estudio mucho más rápido y dinámico

del rodamiento. También se ha calculado la fuerza axial variando la longitud del rotor y ayudándonos con el programa FEMM.

Gracias al nuevo algoritmo diseñado, en este TFM se puede observar como el modelo validado [1], se comporta frente a diferentes variaciones de Gap, diferentes dimensiones, desplazamientos del rotor.

Como trabajo futuro, quedan pendientes las siguientes tareas de investigación:

- Estudio del rodamiento magnético validado [1] con un programa de elementos finitos en 3D, como por ejemplo Opera, para ver su comportamiento en el Eje radial.
- Diseño de un bucle de control con la consigna de corriente adecuada para el control de la estabilidad en dirección axial del rodamiento magnético simulado en este TFM.
- Construcción del modelo de rodamiento magnético activo axial según el modelo simulado en este TFM para acoplarlo al prototipo operativo de rotor levitado de [16].

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kimio Hijikata, Shunsuke Kobayashi, Masatsugu Takemoto, Yasuhiro Tanaka, Akira Chiba, Fellow, IEEE, and Tadashi Fukao, Fellow, IEEE; "Basic Characteristics of an Active Thrust Magnetic Bearing With a Cylindrical Rotor Core"; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 11, november 2008
- [2] F. Matsumura and T. Yoshimoto, "System modeling and control design of a horizontal-shaft magnetic-bearing system," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 22, no. 5, pp. 196–203, May 1986.
- [3] Kimio Hijikata, Masatsugu Takemoto, Satoshi Ogasawara, Akira Chiba, Fellow, IEEE, and Tadashi Fukao, Fellow, IEEE; "Behavior of a Novel Thrust Magnetic Bearing With a Cylindrical Rotor on High Speed Rotation"; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no 10, october 2009
- [4] Z. Yang, L. Zhao, and H. Zhao, "Global linearization and microsynthesis for high-speed grinding spindle with active magnetic bearings," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 1, pp. 250–256, Jan. 2002.
- [5] M. A. Pichot, J. P. Kajs, B. R. Murphy, A. Ouroua, B. M. Rech, R. J. Hayes, J. H. Beno, G. D. Buckner, y A. B. Palazzolo; "Active Magnetic Bearings for Energy Storage Systems for Combat Vehicles"; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, no. 1; enero 2001.
- [6] Alexei V. Filatov and Eric H. Maslen, Associate Member, IEEE; "Passive Magnetic Bearing for Flywheel Energy Storage Systems"; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, no. 6, november 2001.
- [7] Gorazd Štumberger, Drago Dolinar, Uwe Pahner, and Kay Hameyer; "Optimization of Radial Active Magnetic Bearings Using the Finite Element Technique and the Differential Evolution Algorithm"; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 4, july 2000.
- [8] Kouhei Tsuchida, Masatsugu Takemoto, y Satoshi Ogasawara; "A Novel Structure of a 3-axis Active Control Type Magnetic Bearing With a Cylindrical Rotor"; 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); 2010.
- [9] Bostjan Polajžer, Gorazd Štumberger, Jože Ritonja, Oto Težak, Drago Dolinar, y Kay Hameyer; "Impact of Magnetic Nonlinearities and Cross-Coupling Effects on Properties of Radial Active Magnetic Bearings"; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, no. 2; march 2004.
- [10] G. Schweitzer and E. H. Maslen "Magnetic bearings. Theory, design and application to rotating machinery", Capítulos 1 – 2, Ed. Springer, 2009.
- [11] P. K. Agarwala and S. Chand, "Fault tolerant control of three-pole active magnetic bearing", Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 10, pp. 12592 – 12604, 2009.
- [12] J. G. Bai, X. Z. Zhang and L. M. Wang "A flywheel energy storage system with active magnetic bearings", Energy Procedia, vol. 16, pp. 1124 – 1128, 2012.

[13] S. M. Jang, K. H. Kim, K. J. Ko, J. H. Choi, S. Y. Sung and Y. B. Lee, "Characteristic analysis on active thrust magnetic bearings", 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1710 – 1714, 2010.

[14] Junichi Asama, Member, IEEE, Naoya Miyamoto, Takehiro Enomoto, Miya Amada, Student Member, IEEE, Akira Chiba, Fellow, IEEE, and Tadashi Fukao, Fellow, IEEE;" A Novel Design of a Thrust Magnetic Bearing with a Cylindrical-Shaped Rotor"; 978-1-4244-4241-6/09/\$25.00 ©2009 IEEE

[15] Laboratory 510, School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;" Precision Modeling Method Specifically for AC Magnetic Bearings"; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 11, november 2013.

[16] Proyecto de investigación CYCIT\_2011 de la Universidad de Zaragoza "Rodamientos por levitación magnética para volantes de inercia",ref. ENE2011-29741-CO2-02,2011.

[17] Trabajo Fin Master; "Herramienta para el diseño de rodamientos magnéticos axiales"; Autor: José María Pamplona Marco; Escuela Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza; 2013.

[18] Libro P. Abad, V. Alcalá, E. Sainz, J. F. Sanz, M. J. Velilla, J. L. Villa, "Máquinas Eléctricas: Máquinas de corriente continua, transformadores y máquinas de corriente alterna". Copy Center Digital, DL-Z5321-2008

[19] Fraile Mora, Jesús. "Máquinas eléctricas", 6ª edición. Ed. McGraw-Hill/Interamericana, Madrid, 2008

## 10. ANEXOS

### 10.1 PROGRAMA FEMM

En este apartado se muestran diferentes imágenes del programa FEMM para una mayor facilidad de su comprensión. Por ejemplo la siguiente figura muestra como es el mallado en dicho programa:

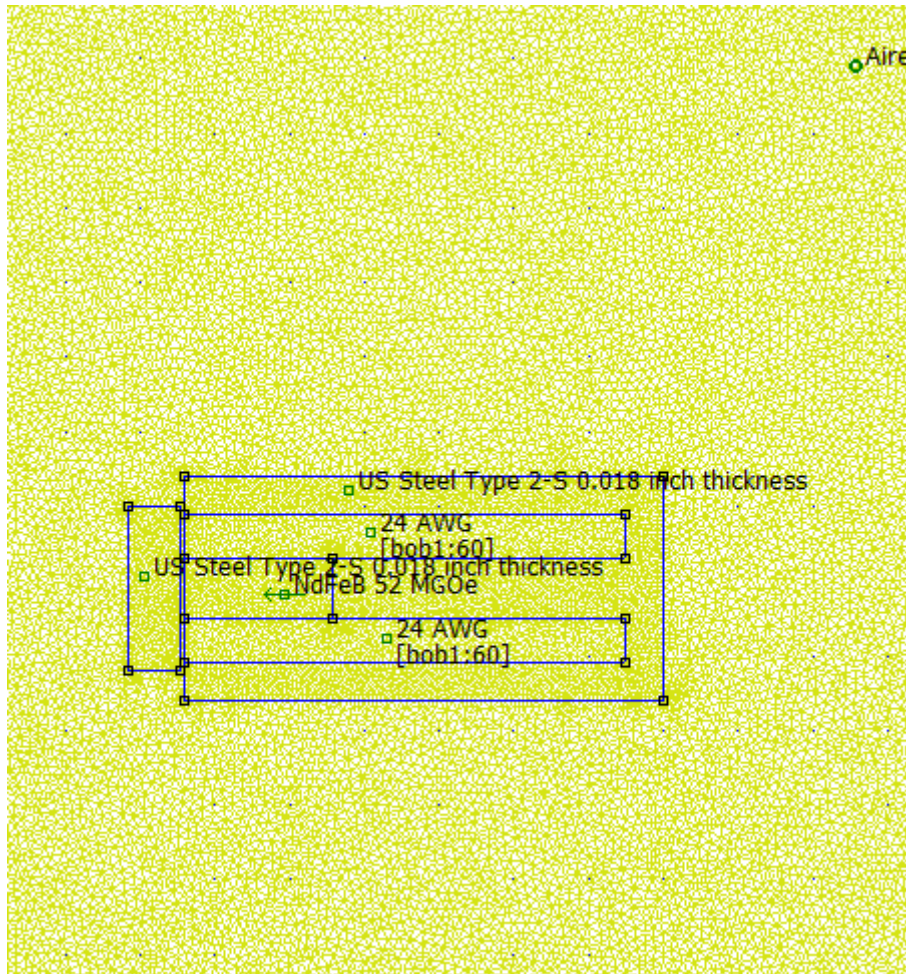


Ilustración 21 Mallado en el Programa FEMM

La siguiente figura muestra, por ejemplo, una de las fronteras utilizadas para una de las pruebas del TFM. Dicha frontera de aire es igual a 1.5 veces el diámetro del estator:

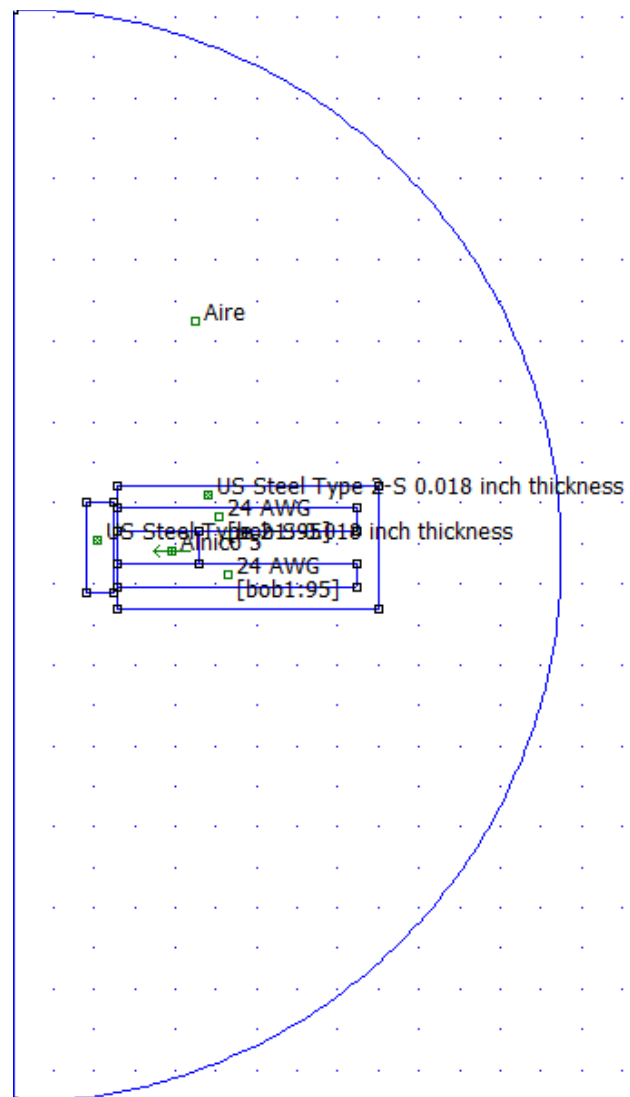


Ilustración 22 Frontera de Aire 1.5 Veces Mayor que el Diámetro del Estator



## 10.2 OCTAVE

### 10.2.1 Interfaz de Octave

En este apartado se va a mostrar un interfaz gráfico para Octave. Este programa es un software libre que está disponible para distintos sistemas operativos. Cuenta con numerosos menús y ventanas de diálogos para facilitar al usuario su funcionamiento.

En la siguiente figura se representa el interfaz gráfico para el programa Octave:

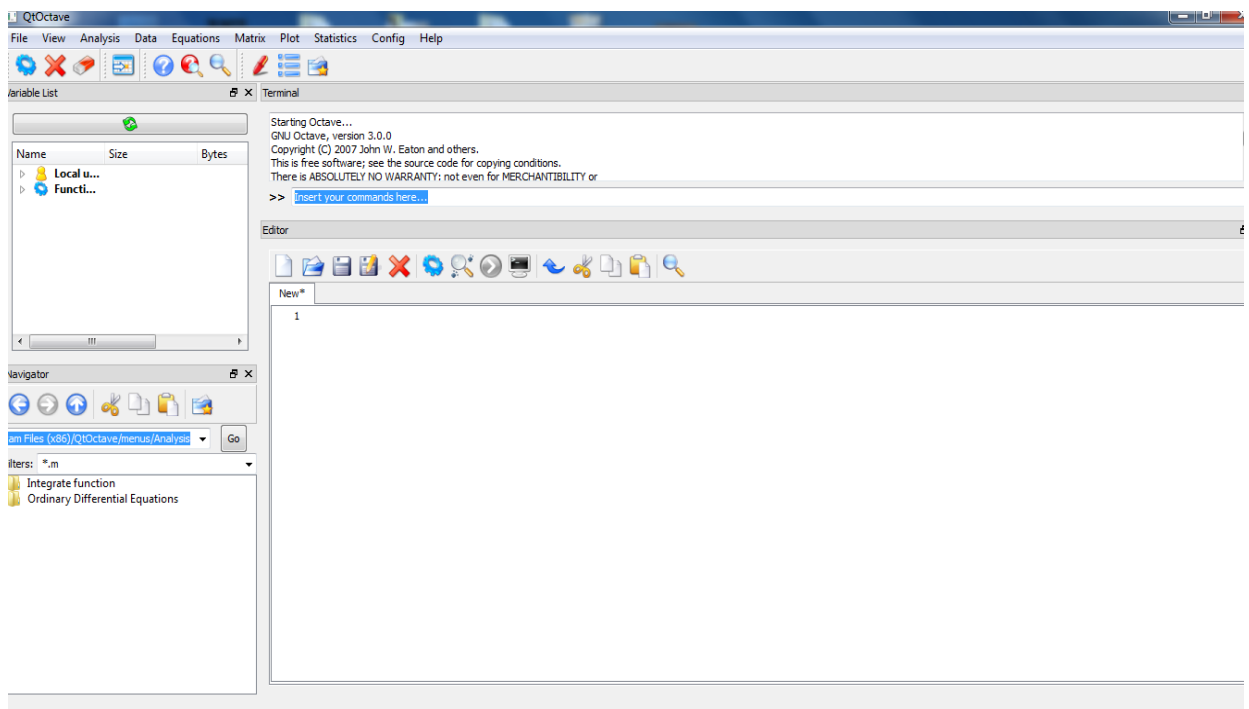


Ilustración 23 Interfaz de Octave

### 10.2.2 Script Ejecutado en Octave"Principal"

```
%-----  
% PROGRAMA DEL DISEÑO DE UN RODAMIENTO MAGNETICO ACTIVO CON FLUJO AXIAL EN FEMM %  
%-----  
  
% Añadimos a OCTAVE la ruta de los ficheros .m del FEMM  
  
addpath("C:\\femm42\\mfiles")  
  
%% Añado a Octave el path al directorio de trabajo  
  
addpath ("C:\\Users\\Asus\\Desktop\\Proyecto Master\\Otro\\RodamientoMagnetico")  
  
%% Cambio de directorio al directorio de trabajo (MODIFICAR SEGUN EL CASO)  
  
cd("C:\\Users\\Asus\\Desktop\\Proyecto Master\\Otro\\RodamientoMagnetico")  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Defino la variable global tipo objeto que contiene los datos del modelo  
  
global Modelo ;  
  
% Cargo las funciones necesarias para resolver el problema (en este ejemplo solo la función de  
dibujar  
  
Cargar_funciones_para_dibujar  
  
% Cargo los datos introducidos por el usuario para diseñar la geometría del rodamiento  
magnético  
  
Datos_Geometria_RodamientoMagnetico  
  
% Cargo los materiales y las propiedades técnicas al diseño del rodamiento magnético  
  
Materiales_y_Condiciones  
  
%%% Inicio la tarea de mi programa  
  
printf("Abriendo FEMM (Iniciando conexión de Octave a FEMM...\n");  
  
openfemm      % Abrimos el FEMM  
  
printf("Creando documento de FEMM para simulación magnética...\n");  
  
newdocument(0);      % Creamos nuevo documento de femm magnético  
  
printf("Especificando características del problema...\n");
```

% Frecuencia -> 0 Hz, al trabajar con corriente en DC; Unidades -> milímetros; Simetría -> axial o axisimétrica; El resto de valores por defecto

mi\_probdef(0, 'millimeters', 'axi', 1.e-8, 0, 30);

% Especificamos las características del problema en femm

%% Dibujo el rodamiento magnético

Dibujar(); % Dibuja el cojinete magnético

%% Aplicación de los materiales a cada parte del rodamiento, características técnicas y condición de contorno

Materiales(); % Aplica las propiedades definidas al rodamiento magnético

% Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM

mi\_saveas('RodamientoMagnetico.FEM');

%Se hace una simulación con FEMM----

mi\_analyze(0);

mi\_loadsolution;

%%%%Post-procesador%%%%

Calculos\_Variacion\_GAP();

%Calculos\_Variacion\_DesplazamientoZ ();

printf("Saldra la tabla de valores");

disp(Modelo.Mallado);

disp("fin");

%%%%Fin del programa

### 10.2.3 Script en Octave “ Cargar funciones para dibujar”

```
%% En esta rutina definimos una función de octave, como ejemplo de su uso

%% def esta primera sentencia para que entienda que el fichero contiene funciones (misterios
de la informática)

function Dibujar()

%% En esta función los datos se transpasan en el objeto Modelo

%% Esta función contiene una variable global tipo objeto estructura de datos (data estructura
object)

global Modelo ;

%% Esta función nos va a dibujar los diferentes parámetros para realizar el diseño de nuestro
rodamiento magnético

mi_drawpolygon([25.8,94;90,94;90,64;25.8,64;25.8,69;85,69;85,75;25.8,75;25.8,83;85,83;85,8
9;25.8,89]);

mi_drawrectangle(Modelo.RinfRODAMIENTO,Modelo.ZinfRODAMIENTO,Modelo.RsupRODAMI
ENTO ,Modelo.ZsupRODAMIENTO);

mi_drawline(25.8,89,25.8,83);

mi_drawline(25.8,75,25.8,69);

mi_drawline(46,83,46,75);

mi_drawrectangle(Modelo.Rinffrontera,Modelo.Zinffrontera,Modelo.Rsupfrontera,Modelo.Zs
upfrontera);

endfunction
```

#### **10.2.4 Script en Octave “Datos\_Geometria\_RodamientoMagnetico”**

% DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA GENERAL (En este caso es un rodamiento magnético activo con flujo axial con simetría axi-simétrica)

%% La geometría se define en la variable Modelo que es un objeto tipo estructura datos de octave

Modelo.GAP = 0.8; % Distancia en r desde el disco magnético al rodamiento magnético [mm]

Modelo.H3 = 22; % Espesor en z del rodamiento magnético [mm]

Modelo.R3 = 18; % Radio interior del rodamiento magnético [mm]

Modelo.R6 = 25; % Radio exterior del rodamiento magnético [mm]

%Coordenadas Frontera de Aire [mm]

Modelo.PX1 = 0;

Modelo.PZ1 = 0;

Modelo.PR2 = 162;

Modelo.PZ2 = 162;

% Coordenadas del rectángulo que representa al rodamiento magnético [mm]

Modelo.RinfRODAMIENTO = Modelo.R3; % Coord r de la esquina inferior del rodamiento magnético

Modelo.ZinfRODAMIENTO = 68; % Coord Z de la esquina inferior del rodamiento magnético

Modelo.RsupRODAMIENTO = Modelo.R6; % Coord r de la esquina superior del rodamiento magnético

Modelo.ZsupRODAMIENTO = 90; % Coord Z de la esquina superior del rodamiento magnético

% Coordenadas del rectángulo que representa la frontera de aire [mm] (En este ejemplo están definidas como componentes de un objeto estructura de datos)

Modelo.Rinffrontera = Modelo.PX1; % Coord r de la esquina inferior de la frontera

Modelo.Zinffrontera = Modelo.PZ1; % Coord Z de la esquina inferior de la frontera

Modelo.Rsupfrontera = Modelo.PR2; % Coord r de la esquina superior de la frontera

Modelo.Zsupfrontera = Modelo.PZ2; % Coord Z de la esquina superior de la frontera

### 10.2.5 Script en Octave “ Materiales\_y Condiciones”

% ----Se asigna un número de GRUPO a cada parte del rodamiento y se le aplica el material correspondiente en FEMM----

%% def esta primera sentencia para que entienda que el fichero contiene funciones (misterios de la informática)

function Materiales()

%% En esta función los datos se traspasan en el objeto Modelo

global Modelo ; %% Esta función contiene una variable global tipo objeto estructura de datos (data estructura object)

% Se cargan los siguientes materiales de la librería de FEMM y se crean los materiales necesarios para el rodamaniento magnético

Modelo.CORRIENTE = 6.79; % Corriente que circula por la bobina [A]

Modelo.PermeabilidadRelativa = 9400; % Permeabilidad relativa del material ferromagnético

Modelo.ConductividadFerromagnetico = 6.25; % Conductividad del material ferromagnético (La inversa de la resistividad)

Modelo.NumeroEspiras = 60; % Número de espiras que contiene la bobina

Modelo.ConductividadConductor = 58; % Conductividad del material que pertenece a la bobina(En este caso es el mismo que el material de librería "Copper")

Modelo.Mallado = 0.6; % Tamaño del mallado en el material

mi\_getmaterial("Air");

mi\_addmaterial("Siliconsteel3%",Modelo.PermeabilidadRelativa,  
Modelo.PermeabilidadRelativa, 0, 0, Modelo.ConductividadFerromagnetico, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0  
);

mi\_getmaterial("Copper");

mi\_getmaterial("NdFeB 52 MGOe");

% Grupo 1 ->Rotor , Grupo 2 -> Estator, Grupo 3 -> Bobinas , Grupo 4 -> Iman

% Seleccionar el Rotor para aplicarle el Grupo 1

mi\_selectsegment(21.5 ,89)

mi\_selectsegment(18.4,79.5)

```
mi_selectsegment(21.3,69)

mi_selectsegment(23.9,79.8)

mi_setgroup(1);

mi_clearselected;
```

#### % Inserción del material al estator en FEMM

```
mi_addblocklabel(21.5,79);

mi_selectlabel(21.5,79);

mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Modelo.Mallado, 0, 0, 1, 0)

mi_clearselected;
```

#### % Seleccionar el Estator para aplicarle el Grupo 2

```
mi_selectsegment(56.7,93.4)

mi_selectsegment(88.8,79)

mi_selectsegment(56.4,64.8)

mi_selectsegment(26.1,66.8)

mi_selectsegment(53.9,68.3)

mi_selectsegment(84.9,72.4)

mi_selectsegment(60.2,76.5)

mi_selectsegment(46.9,79.2)

mi_selectsegment(62.9,82.2)

mi_selectsegment(84.9,86.3)

mi_selectsegment(53.9,90.4)

mi_selectsegment(26.2,91.8)

mi_setgroup(2);

mi_clearselected;
```

#### % Inserción del material al Rodamiento Magnético en FEMM

```
mi_addblocklabel(66.8,78.9);
```

```
mi_selectlabel(66.8,78.9);
```

```
mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Modelo.Mallado, 0, 0, 2, 0)
```

```
mi_clearselected;
```

### % Seleccionar a las bobinas para aplicarle el Grupo 3

```
mi_selectsegment(26.5,85.9)
```

```
mi_selectsegment(53,88.2)
```

```
mi_selectsegment(82.3,86.1)
```

```
mi_selectsegment(50.5,84.5)
```

```
mi_selectsegment(35.2,84.3)
```

```
mi_selectsegment(26.5,72)
```

```
mi_selectsegment(35,74.1)
```

```
mi_selectsegment(60,73.7)
```

```
mi_selectsegment(82.5,72.1)
```

```
mi_selectsegment(50.8,69.7)
```

```
mi_setgroup(3);
```

```
mi_clearselected;
```

### % Inserción del material a la bobina en FEMM

```
mi_addcircprop ('Idc', Modelo.CORRIENTE, 1); % Corriente del devanado estático
```

```
mi_addblocklabel(55.4,86);
```

```
mi_selectlabel(55.4,86);
```

```
mi_addblocklabel(51.7,72);
```

```
mi_selectlabel(51.7,72);
```

```
mi_setblockprop("Copper", 0, Modelo.Mallado, 'Idc',0,3, Modelo.NumeroEspiras);
```



```
mi_clearselected;
```

% Seleccionar al Iman para aplicarle el Grupo 4

```
mi_selectsegment(26.3,78.7)
```

```
mi_selectsegment(35.9,81.9)
```

```
mi_selectsegment(43.9,79.4)
```

```
mi_selectsegment(34.2,76.2)
```

```
mi_setgroup(4);
```

```
mi_clearselected;
```

% Inserción del material a iman en FEMM

```
mi_addblocklabel(((25.8+46)/2), (( 83+75)/2));
```

```
mi_selectlabel(((25.8+46)/2), (( 83+75)/2));
```

```
mi_setblockprop("NdFeB 52 MGOe", 0, Modelo.Mallado, 0, 180, 4, 0)
```

```
mi_clearselected;
```

% Inserción del material aire al interior de la frontera en FEMM

```
mi_addblocklabel(40.9,108);
```

```
mi_selectlabel(40.9,108);
```

```
mi_setblockprop("Air", 0, Modelo.Mallado, 0, 0, 5, 0)
```

```
mi_clearselected;
```

% -----Condiciones de contorno-----

% Queremos un flujo magnético que sea tangencial a dicho segmentos.

```
mi_addboundprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
```

% Seleccionar a la frontera para aplicarle la condición de contorno

```
mi_selectsegment(6,84)
```

```
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)

mi_selectsegment(69,147.2)
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)

mi_selectsegment(138.4,81)
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)

mi_selectsegment(75.9,24.1)
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)

mi_clearselected;

endfunction
```

#### **10.2.6 Script en Octave “ Calculos Variacion Gap”**

```
%%Vamos a lograr el cálculo de la fuerza en función de la variación del GAP
% Se selecciona el área del disco (Grupo = 1) y se calcula la fuerza axial con un bucle "for"

Modelo.n=4;                %Número de intervalos o número de medidas

x=zeros(Modelo.n,05);
f=zeros(Modelo.n,0.5);
Modelo.traslacion=0.2;

for k=1:Modelo.n
    mi_analyze;
    mi_loadsolution;
    mo_groupselectblock(1);
    Modelo.x(k)=(Modelo.GAP+(Modelo.traslacion*(k-1)));
    Modelo.f(k)=mo_blockintegral(19);
    mi_selectgroup(1);
```

```
mi_movetranslate(Modelo.traslacion,0);    % Dibuja en dirección a la parte positiva del Eje R
%mi_movetranslate(-Modelo.traslacion,0); %Dibuja en dirección a la parte negativa del Eje R
mi_clearselected;
end

% Se representa gráficamente la Fuerza axial ejercida en el disco frente a la variación del GAP.

figure;
plot(Modelo.x, Modelo.f,'ro');
hold on;
grid on;
plot(Modelo.x, Modelo.f,'r-', 'LineWidth', 2);
xlim([0.8 2]);
xlabel('Gap(mm)');
ylabel('Fuerza axial (N)');
title('Fuerza axial vs. Gap');
save("datoImagen.dat");
disp(Modelo.x)
disp(Modelo.f);
```

### **10.2.7 Script en Octave “ Calculos Variacion DesplazamientoZ”**

```
%%Vamos a lograr el cálculo de la fuerza en función del desplazamiento del rotor en Eje Z
% Se selecciona el área del disco (Grupo = 1) y se calcula la fuerza axial con un bucle "for"

Modelo.n=4;          %Número de intervalos o número de medidas

x=zeros(Modelo.n,05);

f=zeros(Modelo.n,0.5);

Modelo.traslacion=0.2;

for k=1:Modelo.n

mi_analyze;
```

```
mi_loadsolution;

mo_groupselectblock(1);

Modelo.x(k)=(Modelo.GAP+(Modelo.traslacion*(k-1)));

Modelo.f(k)=mo_blockintegral(19);

mi_selectgroup(1);

mi_movetranslate(0,Modelo.traslacion);    % Dibuja en dirección a la parte positiva del Eje Z

%mi_movetranslate(0,-Modelo.traslacion); % Dibuja en dirección a la parte negativa del Eje Z

mi_clearselected;

end

% Se representa gráficamente la Fuerza axial ejercida en el disco frente al desplazamiento en Z

figure;

plot(Modelo.x, Modelo.f,'ro');

hold on;

grid on;

plot(Modelo.x, Modelo.f,'r-', 'LineWidth', 2);

xlim([0.8 2]);

xlabel('Desplazamiento en Eje Z(mm)');

ylabel('Fuerza axial (N)');

title('Fuerza axial vs. Desplazamiento en Z');

save("datoImagen.dat");

disp(Modelo.x)

disp(Modelo.f);
```